بررسی آزمایشگاهی تأثیر طوق در کاهش عمق آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه‌های مستطیلی و دیواربال‌ه‌ای★

عبداله اردشیر[۱] روح‌اله چراغی[۲] حجت کرمی[۳]

چکیده آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاههای کناری پل، از عوامل مهم در واژگونی و تخریب پل‌ها به شمار می‌آید. روش‌های متعددی مانند سنگ چین جهت مهار و مقابله با آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها وجود دارد؛ یکی از روش‌های کاهش آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه، استفاده از طوق محافظ در اطراف آن می‌باشد. در این مطالعه، تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر(تراز بالاتر، روی بستر و تراز پایین‌تر از بستر)، شکل و اندازه طوق به صورت ضریبی از طول تکیه‌گاه (L_a) در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در حالت آستانه حرکت ذرات بستر و در حالت آب‌شستگی آب زلال، با مصالح بستر یکنواخت و تا زمان رسیدن به زمان تعادل نسبی انجام شده‌است. در این تحقیق عملکرد طوق کامل و تکه‌ای به عنوان محافظ بستر بر روی دو نوع تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای ٤٥ درجه بررسی شده است و در تمامی آزمایش‌ها از تکیه‌گاه کوتاه (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کوچکتر مساوی یک) استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول طوق میزان آب‌شستگی کاهش می‌یابد و مهم‌ترین پارامتر موثر در کاهش آب‌شستگی، طول طوق می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی در بهترین حالت، کاهش عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه مستطیلی (طوق در تراز پایین‌تر از بستر) و دیوار باله‌ای (طوق در تراز بستر) برای طوق به طول ۲/۲۵L_a به ترتیب برابر است با ۸۷/۸ و ٦۷/۸ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی تکیه‌گاه پل، کاهش عمق آب‌شستگی، طوق، مدل آزمایشگاهی و هیدرولیک کانال‌های باز.

Experimental Study of Effect of Collar on Local Scour Reduction around Vertical and 45˚ Wing wall Abutments

A. Ardeshir R. Cheraghi H. Karami

Abstract *Local scour around the abutment is of utmost importance in bridge failures. Numerous methods such as riprap have been proposed to reduce the destructive effects of scouring; one of the ways to harness and reduce the local scour depth is installed protective collars around the abutment. In this paper effect of collar elevation (upper level, bed level and lower level), collar geometry and its size as a multiplier of the length of the abutment (L_a) have been experimentally investigated. All experiments were performed at the threshold of bed material motion under clear-water conditions and uniform-sized bed material. In this study the full-collar and partial collar performance as a bed protective on the two types of abutments; vertical wall and 45˚ wing wall abutment were investigated. The abutment considered in all experiments was short (ratio of abutment length to approach flow depth less than unity). Results from the experiments indicate that by increasing the collar width the local scour reduced and the collar width is utmost importance parameter in scour depth reduction. The Experimental results presented show in the best case, percentage of scour depth reduction that around the vertical wall (collar at lower bed elevation) and wing wall abutment (collar at streambed elevation) which is 2.25 times wider than the abutment width, was obtained 87.8 and 67.8.*

Key Words Abutment, Scour depth reduction, Collars, Experimental model and open channel hydraulics.

★تاریخ تصویب مقاله ۹۰/۱۰/۲۷ و تاریخ دریافت نسخه نهایی اصلاح شده ۹۱/٤/۱٤

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و رئیس پژوهشکده محیط زیست دانشگاه امیرکبیر

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران – آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(۳) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مقدمه

خرابی پل از لحاظ اجتماعی و اقتصادی مسئله‌ی بسیار مهمی به شمار می‌آید و در طی چندین دهه گذشته در این زمینه مطالعات فراونی انجام شده است. تخریب پل‌ها در نتیجه آب‌شستگی پی یا تکیه‌گاه پل‌ها موجب ترغیب روزافزون پژوهشگران برای مطالعه و بررسی پدیده آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل و ارائه روشهای کنترل و کاهش آب‌شستگی شده است. یکی از روش‌های ارائه شده، نصب طوق محافظ در مجاورت تکیه‌گاه می‌باشد و تحقیقات اندکی در زمینه تأثیر طوق در کاهش آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه انجام شده است. طوق یک ورقه فولادی دایره‌ای یا مستطیلی متصل به پایه یا تگیه‌گاه پل است که ممکن است در ترازهای مختلف از بستر نصب شود. طوق صفحه‌ای با ضخامت کم جهت ایجاد تغییر الگوی جریان اطراف تکیه‌گاه و در نتیجه کنترل ابعاد آب‌شستگی است. طوق با قرارگیری در اطراف تکیه‌گاه و یا پایه‌پل به عنوان مانعی در برابر جریان رو به پایین و گردابه‌های ایجاد شده، با تغییر الگوی جریان آب موجب کاهش عمق آب‌شستگی در این محدوده می‌شود.

در چندین دهه گذشته مطالعات بسیاری جهت شناخت مکانیزم، توسعه آب‌شستگی و پدیده آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه، توسط افرادی چون ملویل [1]، دی و همکاران [2]، ملویل و همکاران [3] و مولیناس وهمکاران [4] انجام شده است. اکثر آزمایش‌هایی که در زمینه تأثیر طوق بر روی پایه‌پل مورد بررسی قرار گرفته، توسط افرادی چون چیو [5]، کومار و همکاران [6] و مشاهیر و همکاران [7,8] انجام شده‌است. چیو در سال ۱۹۹۲ با انجام آزمایشاتی به بررسی تاثیر طوق، شکاف و ترکیب این دو بر روی کاهش آب‌شستگی پایه پل پرداخت [5]. کومار و همکاران در سال ۱۹۹۹ پس از انجام آزمایش‌هایی دریافتند که طوق در هر سطحی که قرار بگیرد، جریان را به دو ناحیه بالایی و پایینی طوق تقسیم می‌کند و این مسئله باعث کاهش قدرت گردابه‌های ایجاد شده می‌شود [6]. مشاهیر و همکاران در سال ۲۰۰۴ به این نتیجه رسیدند که طوق با ابعاد سه برابر پایه مستطیلی بر روی بستر بهترین کارایی(کاهش عمق آب‌شستگی حدود ۶۰ درصد) را دارد [7]. هیو لی و همکاران در سال ۲۰۰۶مطالعاتی در زمینه تأثیر طوق در کاهش آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در حالت آب‌زلال انجام دادند، آنها دریافتند که اندازه طوق موثرترین پارامتر در میزان عمق آب‌شستگی است و همچنین به این نتیجه رسیدند که عمق آب‌شستگی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد [9] . کایاتورک و همکاران در سال ۲۰۰۴در زمینه عملکرد طوق بر پیشرفت آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی بلند در آستانه حرکت ذرات بستر انجام داده‌اند. آنها با نصب طوق با اندازه‌های مختلف در ترازهای متغیر دریافتند که با قرارگیری طوق در تراز پایین تر از بستر نتایج بهتری حاصل می‌شود. بر اساس این آزمایش‌ها، زمانی که طوق در تراز ۵۰ میلی‌متر پایین‌تر از کف کانال قرار بگیرد، آب‌شستگی تا ۶۷ درصد کاهش می‌یابد [10].

در مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام‌شده، تأثیر و کارایی طوق اطراف تکیه‌گاه کوتاه (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کوچکتر مساوی یک) بررسی نشده‌است، همچنین میزان تأثیر طوق بر روی شکل‌های مختلف تکیه‌گاه مطالعه نشده است. بنابر این در تحقیق حاضر، تأثیر تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر(تراز بالاتر از بستر، روی بستر و پایین‌تر از بستر)، شکل طوق (طوق کامل و طوق تکه‌ای) و اندازه طوق، بر روی کاهش عمق آبشستگی پیرامون شکل‌های مختلف تکیه‌گاه کوتاه (مستطیلی و دیوار باله‌ای) بررسی شده است، همچنین توسعه زمانی آب‌شستگی در مجاورت تکیه‌گاه در حضور و بدون حضور طوق مورد مطالعه قرار گرفته است.

مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های تحقیق حاضر در فلوم مستطیلی به طول ۱۴ متر، عرض ۱متر و عمق ۱متر با شیب طولی ۰/۰۰۰۴ واقع در آزمایشگاه محیط‌های متخلل دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده‌است (شکل ۱)؛ دیواره‌های فلوم از جنس شیشه‌ای قابل رویت، جهت مشاهده تغییرات سطح جریان آب و تغییرات بستر کانال، ساخته شده‌است. طول فلوم در بالادست محل قرارگیری تکیه‌گاه به گونه‌ای انتخاب شد که جریان کاملاً توسعه یافته باشد. برای محاسبه طول جریان توسعه یافته از رابطه‌ای که توسط کرک‌گز و آردیچ‌گلو [11] برای جریان در کانال‌های روباز ارائه شده است، استفاده گردید. جهت مشاهده تغییرات پروفیل بستر و جریان آب در همسایگی تکیه‌گاه، از جنس پلکسی گلس به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده است. در محدوده آزمایش، عمق ماسه ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌است. این ضخامت بر اساس محاسبات اولیه با استفاده از روابط محققین قبلی و همچنین مشاهدات اولیه انتخاب گردید تا حداکثر عمق آبشستگی به کف فلوم آزمایشگاهی نرسد. قطر میانگین ذرات بستر (D_{50}) ۰/۹۱ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ($\sigma_g = 1.38 < 1.4$) ۱/۳۸، چگالی نسبی ۲/۶۵ و سرعت برشی بحرانی (U_{*cr}) ۰/۰۲۱ متر بر ثانیه است که از طریق دیاگرام شیلدز بدست آمده‌است.

در تمامی آزمایش‌ها تکیه‌گاه کوتاه($L_a/Y \le 1.0$) مورد مطالعه قرار گرفته‌است و در حالت آب‌شستگی آب زلال تحت شرایط آستانه حرکت ذرات بستر هدایت شده‌است. طوق‌ها از جنس پلکسی گلس با ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشند و با استفاده چسب آکواریوم به تکیه‌گاه متصل شده است.

برای محاسبه و تنظیم مقادیر مختلف (U_{cr}/U_{*cr}) جهت محاسبه مقدار دبی آستانه حرکت، از رابطه (۱) که توسط لاچلان و ملویل [12] ارائه شده، استفاده گردیده است.

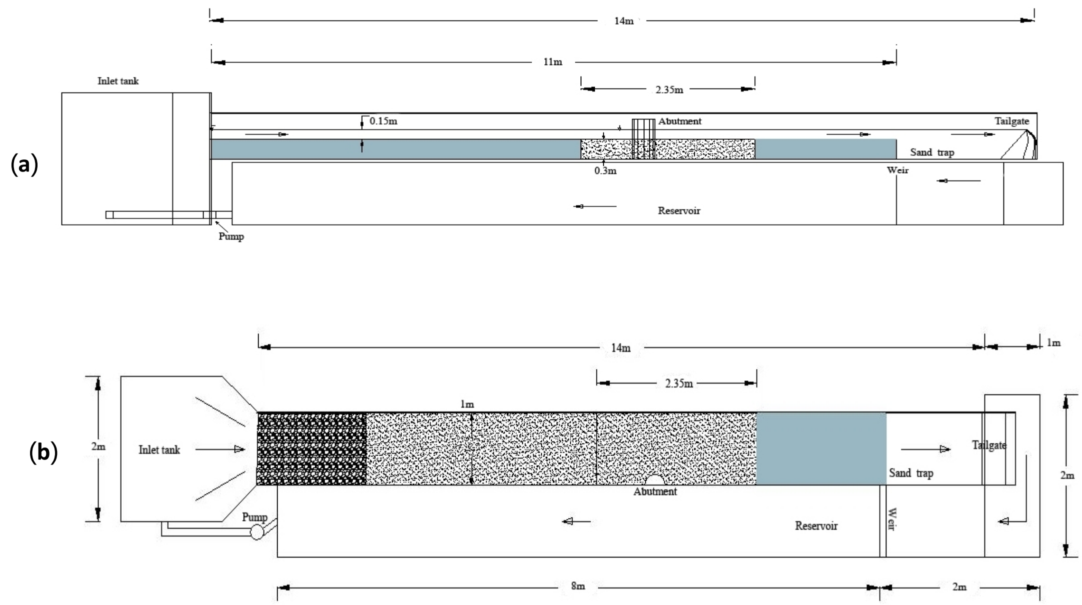
$$U_{cr}/U_{*cr} = 5.75\log(Y/K_S) + 6 \qquad (۱)$$

در این رابطه U سرعت متوسط جریان، U_{cr} سرعت بحرانی ذرات بستر (آستانه حرکت ذرات)، U_{*cr}سرعت برشی بحرانی ذرات است که از دیاگرام شیلدز بدست می‌آید و برای شرایط حاکم بر آزمایش‌ها برابر با ۰/۰۲۱ متر بر ثانیه محاسبه گردید. Y عمق جریان در بالادست تکیه‌گاه و K_s زبری معادل مصالح بستر می‌باشد و با توجه به این‌که آزمایش‌ها در شرایط آب زلال ($U/U_{cr} < 1$) و بدون انتقال رسوب از بالادست انجام شده است این پارامتر برابر با $2D_{50}$ می‌باشد. طبق تحقیقات انجام شده توسط ملویل حداکثر عمق آب‌شستگی، در شرایط آستانه حرکت ذرات بستر اتفاق می‌افتد [13]. بنابراین، نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. برای عمق جریان ۰/۱۵ متر، با درنظر گرفتن آستانه حرکت ذرات بستر، دبی جریان ۵۲ لیتر بر ثانیه بدست آمده‌است. دو نوع شکل تکیه‌گاه در این تحقیق مطالعه شده است که در ادامه ابعاد تکیه‌گاه تعریف شده است. طول طوق(W_c) ، تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر(Z_c) و نسبت سطح مقطع طوق به سطح مقطع کل (مجموع سطح مقطع تکیه‌گاه و طوق) که با نماد A_c/A_T در جدول (۱) نمایش داده شده است. V1 و W1 آزمایش برای حالت بدون طوق به ترتیب برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار بالدای، VT و WT آزمایش‌های با طوق کامل و VP و WP با طوق تکه‌ای است که به ترتیب برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای می‌باشد و شماره آزمایش‌ها با اعداد ۱ الی ۱۲ مشخص شده است.

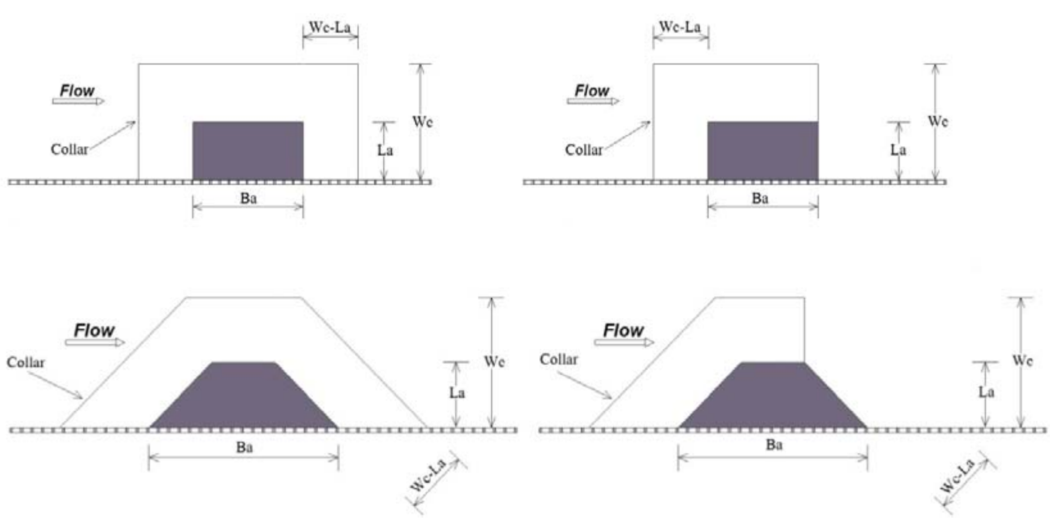
در شکل (۲) تصویر شماتیکی از ابعاد تکیه‌گاه و طوق، به صورت جداگانه برای دو نوع تکیه‌گاه، رسم شده است. در تمامی آزمایش‌ها L_a و B_a برای تکیه‌گاه مستطیلی به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۳۰ متر و در تکیه‌گاه دیوار باله‌ای به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۴۵ متر در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل زیر مشخص می‌باشد در طوق تکه‌ای قسمت پایین‌دست تکیه‌گاه بدون محافظ می‌باشد و تأثیر این پارامتر نیز

مورد بررسی قرار گرفته‌است.

جهت برداشت تغییرات بستر فلوم اطراف تکیه‌گاه پس از اتمام آزمایش‌ها از دستگاه دیجیتالی بسترنگار معروف به Laser Bed Profiler (LBP) استفاده گردیده است. این دستگاه قادر به برداشت تغییرات بستر بادقت ۰/۱ میلی‌متر در مقاطع ۱ میلی‌متری عرض کانال می‌باشد و در طول کانال به وسیله دست حرکت می‌کند. در هر آزمایش بیش از ۴۰۰۰۰ داده مربوط به تغییرات بستر اطراف تکیه‌گاه به صورت (X,Y,Z) برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار Surfer توپوگرافی بستر رسم گردیده است.



شکل ۱ (a) نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی؛ (b) پلان فلوم آزمایشگاهی و اجزای مختلف آن



شکل ۲ پلان تکیه‌گاه و طوق:(a-1,2) طوق کامل و تکه‌ای در تکیه‌گاه مستطیلی؛ (b-1,2) طوق کامل و تکه‌ای در تکیه‌گاه دیوار باله‌ای

جدول ۱ پارامترهای متغیر در انجام آزمایشها

آزمایش	W_c/L_a	Z_c/L_a	A_c/A_T
V1	۰	–	۰
VT2	۲/۲۵	۰	۰/۸۰۲
VT3	۲	۰	۰/۷۵
VT4	۱/۷۵	۰	۰/۶۷۳
VT5	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۸۰۲
VT6	۲	-۰/۲	۰/۷۵
VT7	۱/۷۵	-۰/۲	۰/۶۷۳
VT8	۲/۲۵	+۰/۲	۰/۸۰۲
VP9	۲/۲۵	۰	۰/۷۲۶
VP10	۲	۰	۰/۶۶۷
VP11	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۷۲۶
VP12	۲	-۰/۲	۰/۶۶۷
W1	۰	–	۰
WT2	۲/۲۵	۰	۰/۷۹۳
WT3	۲	۰	۰/۷۳۹
WT4	۱/۷۵	۰	۰/۶۶۱
WT5	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۷۹۳
WT6	۲	-۰/۲	۰/۷۳۹
WT7	۱/۷۵	-۰/۲	۰/۶۶۱
WT8	۲	+۰/۲	۰/۷۳۹
WP9	۲/۲۵	۰	۰/۶۹
WP10	۲	۰	۰/۶۲۵
WP11	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۶۹
WP12	۲	-۰/۲	۰/۶۲۵

شرح آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

در این تحقیق جهت مطالعه تأثیر طوق بر مکانیزم آب‌شستگی و تغییرات زمانی آن پارامترهایی چون طول (جلو آمدگی) طوق، شکل (کامل یا تکه‌ای) طوق و همچنین تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر کانال (کف بستر، تراز بالاتر و پایین تر) بررسی و مطالعه شده است. آزمایش‌ها در دو بخش بدون طوق و در حضور طوق بررسی شده است. برای حالت قرارگیری طوق در کنار تکیه‌گاه، سه حالت بر اساس تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر مطالعه شده است.

آزمایش بدون طوق

با توجه به اهمیت مسئله زمان در آزمایش‌ها ابتدا آزمایش‌هایی جهت تعیین زمان تعادل نسبی آب‌شستگی به مدت ۷۰ ساعتی، انجام گردیده و با

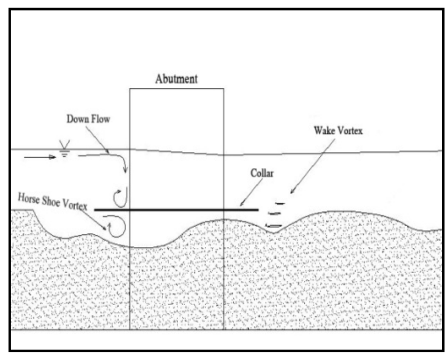
توجه به توسعه آب‌شستگی و تغییرات زمانی، با در نظر گرفتن ۹۵ درصد عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه زمان تعادل نسبی ٤٠ ساعت بدست آمده است. زمان تعادل نسبی آب‌شستگی این‌گونه تعریف می‌شود که پس از گذشت ۲ ساعت تفاوت عمق آب‌شستگی کمتر از ۱ میلی‌متر باشد [2]. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که آب‌شستگی تحت تأثیر جریان روبه‌پایین در همسایگی نوک دماغه بالادست تکیه‌گاه و با زاویه تقریبی ٤٥ درجه شروع شده و با تشدید مکانیزم آبشستگی و ایجاد گردابه نعل اسبی، ذرات بستر در اختیار جریان اصلی قرارگرفته و به پایین‌دست منتقل می‌گردد. در مرحله اول آب‌شستگی (حدود ٦٠ درصد میزان آب‌شستگی کل)، برای تکیه‌گاه مستطیلی ١٤٠ دقیقه و تکیه‌گاه دیوار باله‌ای ۱۰۰ دقیقه پس از شروع آزمایش، رخ داده است. سرعت حفر کناره تکیه‌گاه بسیار سریع بوده و رفته رفته نرخ آب‌شستگی کاهش یافته و پس از آن مرحله گسترش آب‌شستگی و وسیع شدن آب‌شستگی در همسایگی تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد. در نهایت با گذشت زمان با استهلاک انرژی جریان گردابه، فرآیندآب‌شستگی به تعادل نسبی می‌رسد. حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای به ترتیب ٢٤/٥ و ۲۰/۸ سانتی‌متر و در مجاورت تکیه‌گاه بدست آمده است.

طوق در تراز بستر

با نصب طوق محافظ در کناره تکیه‌گاه، جریان روبه‌پایین هنگام برخورد به طوق از بستر منحرف می‌شود و از برخورد مستقیم جریان به بستر جلوگیری می‌شود [5]، در نتیجه طوق باعث جابجایی آبشستگی از محل تکیه‌گاه و کاهش آن می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، برخلاف حالت بدون طوق که آب‌شستگی به سرعت در کناره تکیه‌گاه (بالادست و پایین‌دست) مشاهده می‌شود، در ساعات اولیه در گوشه طوق آب‌شستگی با شدت کم‌تری اتفاق می‌افتد. با نصب طوق در کناره تکیه‌گاه شروع آب‌شستگی در دو ناحیه‌ی گوشه بالادست طوق و گوشه پایین‌دست طوق رخ می‌دهد و تحت تأثیر گردابه‌های برخاستی حفره ای در پایین‌دست طوق ایجاد می‌گردد. میزان آب‌شستگی در ناحیه بالادست طوق در مجاورت تکیه‌گاه مستطیلی بیش‌تر از تکیه‌گاه دیوار باله‌ای می‌باشد. همچنین، آب‌شستگی در ناحیه پایین‌دست طوق با توجه به این مسئله که گرداب برخاستی اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای شدید تر از تکیه‌گاه مستطیلی است، بیشتر است. نرخ آب‌شستگی این دو ناحیه وابسته به اندازه طوق است؛ بدین صورت که با افزایش اندازه طوق، میزان نسبت آب‌شستگی ناحیه بالادست به پایین‌دست کاهش می‌یابد. این حفره با گذشت زمان حجیم‌تر شده و از زیر طوق به سمت بالادست توسعه می‌یابد. با گسترش حفره در زیر طوق مسیری جهت عبور جریان از زیر طوق ایجاد شده و سپس ذرات زیر طوق توسط جریان به تدریج انتقال می‌یابد. انتقال ذرات ماسه زیر طوق به گونه ای است که آب‌شستگی به سمت گوشه بالادست تکیه‌گاه میل پیدا می‌کند. در طوق تکه‌ای با توجه به حذف تکه‌ی واقع در پایین‌دست طوق، ناحیه گوشه پایین‌دست طوق در مجاورت پایین‌دست تکیه‌گاه قرار می‌گیرد. در طوق تکه‌ای اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای شروع آب‌شستگی مانند تکیه‌گاه مستطیلی می‌باشد با این تفاوت که عمق آب‌شستگی در ناحیه پایین‌دست بیش‌تر است.

برای بهترین حالت، طوق با طول $2.25L_a$ عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه مستطیلی ۹/۲ سانتی‌متر (٦٤/٢ درصد کاهش) است و مقدار عمق ماکزیمم آب‌شستگی کل در فاصله‌ی ۳۲ سانتی‌متری از تکیه‌گاه، ۱۱/٦ سانتی‌متر (٤٧/٣ درصد کاهش) می‌باشد. برای تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در بهترین حالت، طوق با طول $2.25L_a$ عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه را ٦٧/٣ درصد کاهش داده است و مقدار عمق ماکزیمم

آب‌شستگی کل در فاصله‌ی ۱۹ سانتی‌متری از تکیه‌گاه، ۱۱/۸ سانتی‌متر (٤٣/٣ درصد) می‌باشد. همچنین تفاوت عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه دیوار باله‌ای برای طوق کامل و تکه‌ای درصد کاهش عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه برای طوق کامل و تکه‌ای به طول $2L_a$ تقریبا برابر (به ترتیب ٤٥/٦ و ٤٦/٢ درصد) می‌باشد. پروفیل طولی تغییرات بستر در حضور طوق با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، به صورت شماتیک در شکل (۳) رسم شده است.



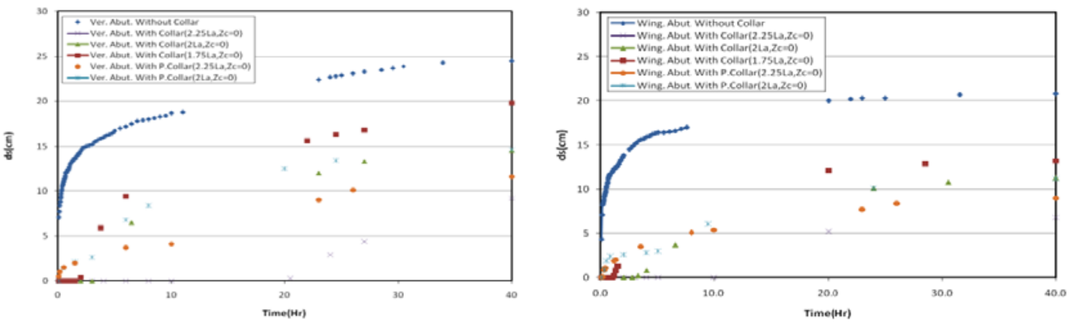
شکل ۳ نمای کلی از پروفیل طولی تغییرات بستر در محدوده تکیه‌گاه

مطابق نمودار تغییرات زمانی حداکثر عمق آب‌شستگی (شکل ٤) شروع آب‌شستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه در تمامی آزمایش‌ها در حضور طوق کامل و تکه‌ای، به تأخیر می‌افتد؛ مدت زمانی که آب‌شستگی از گوشه خارجی طوق شروع شده و از زیر طوق به کناره تکیه‌گاه می‌رسد به عنوان مدت زمان شروع آب‌شستگی در نظر گرفته شده‌است.

در شکل (٤)، Ver.Abut نشان دهنده تکیه‌گاه مستطیلی، Wing.Abut نشان دهنده تکیه‌گاه دیوار باله‌ای، Without.Collar برای حالت بدون طوق، With.Collar برای حالات در حضور طوق کامل، With P.Collar برای حالات در حضور طوق تکه‌ای و d_s حداکثر عمق آبشستگی پیرامون کوله می‌باشد. زمان شروع آب‌شستگی کناره دیوار تکیه‌گاه (مدت زمان رسیدن حداکثر آبشستگی به کناره تکیه‌گاه) برای آزمایش‌های VT2، VT3 و VT4 به ترتیب برابر ۱۲۰۰ (۲۰ ساعت)، ۱۸۰ و ۱۰۰ دقیقه پس از شروع آزمایش می‌باشد و در آزمایش‌های VP9 و VP10 به ترتیب پس از ۸۱۰ (۱۳/۵ ساعت) و ۱۵۰ دقیقه، آب‌شستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد. این زمان برای آزمایش‌های WT2، WT3 و WT4 به ترتیب برابر ۷۸۰ (۱۳ ساعت)، ۱۸۰ و ٦۰ دقیقه پس از شروع آزمایش می‌باشد و در آزمایش‌های WP9 و WP10 به ترتیب پس از ٦۹۰ (۱۱/۵ ساعت) و ۱۲۰ دقیقه آب‌شستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد.

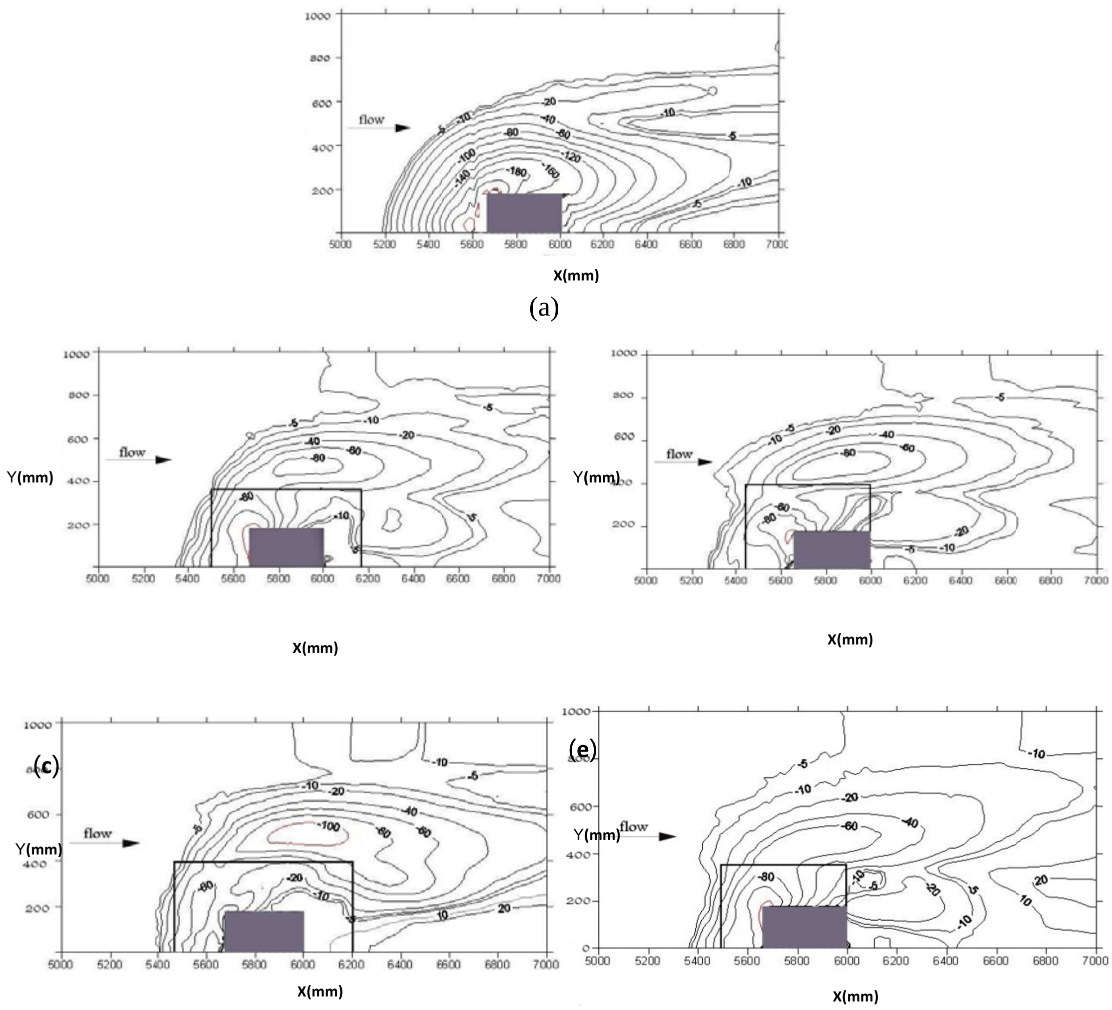
تغییرات توپوگرافی بستر در محدوده ۵ الی ۷ متری از ابتدای فلوم در شکل‌های (٦ و ۵) نشان داده شده است. در این شکل‌ها X جهت مسیر جریان (طول فلوم) و Y عرض فلوم است. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش طول طوق محل قرارگیری عمق ماکزیمم آب‌شستگی به ناحیه‌ای دورتر از مجاورت تکیه‌گاه منتقل شده است. برای طوق با عرض ۲ برابر طول تکیه‌گاه، عمق ماکزیمم کل آب‌شستگی در کناره تکیه‌گاه رخ می‌دهد در حالی که با افزایش عرض طوق فاصله عمق ماکزیمم از تکیه‌گاه بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش طول طوق، با توجه به خطوط تراز آب‌شستگی سطحی از بستر که تحت تأثیر آب‌شستگی قرار گرفته برای تکیه‌گاه مستطیلی به طور میانگین حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

با نصب طوق در مجاورت تکیه‌گاه به دلیل حفر ذرات بستر در قسمت خارجی طوق، یک کانال کوچک در این طوق ایجاد می‌شود و در نتیجه مسیر عبور جریان آب به ناحیه‌ای دورتر از تکیه‌گاه منحرف می‌شود.



(a) (b)

شکل ٤ نمودار تغییرات عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره بدون طوق و با طوق در تراز بستر نسبت به زمان برای (a)تکیه‌گاه مستطیلی و (b)تکیه‌گاه دیوار باله‌ای

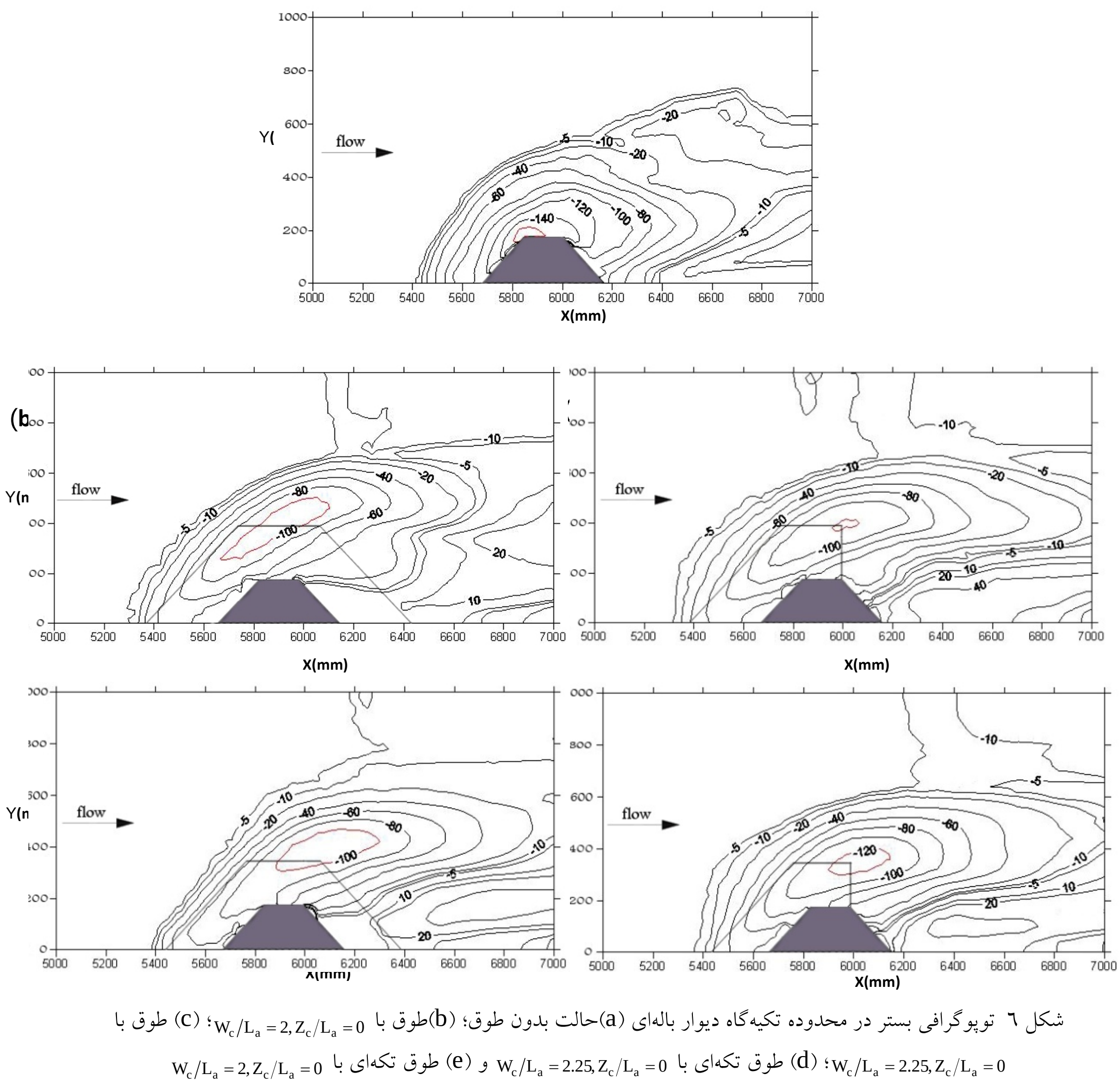


شکل ٥ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه مستطیلی (a)حالت بدون طوق؛ (b)طوق با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$؛ (c) طوق با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$؛ (d) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$ و (e) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$

با توجه به شکل (٦)، محل قرارگیری عمق ماکزیمم آب‌شستگی کل در طوق‌های کامل و تکه‌ای، در محدوده گوشه خارجی طوق می‌باشد که این مقدار برای این پنج آزمایش ١١/٨ الی ١٢/٩ سانتی‌متر از کناره تکیه‌گاه دیوار باله‌ای می‌باشد. تفاوت بارز بین طوق‌های کامل و تکه‌ای، انباشته شدن ذرات رسوب بیش‌تر در پایین‌دست تکیه‌گاه برای حالت طوق تکه‌ای می‌باشد. این مسئله با توجه به ایجاد مسیر باریک زیرین طوق و همچنین کاهش میزان گرداب برخاستی برای طوق کامل با توجه به حضور طوق در پایین‌دست تکیه‌گاه توجیه پذیر است.

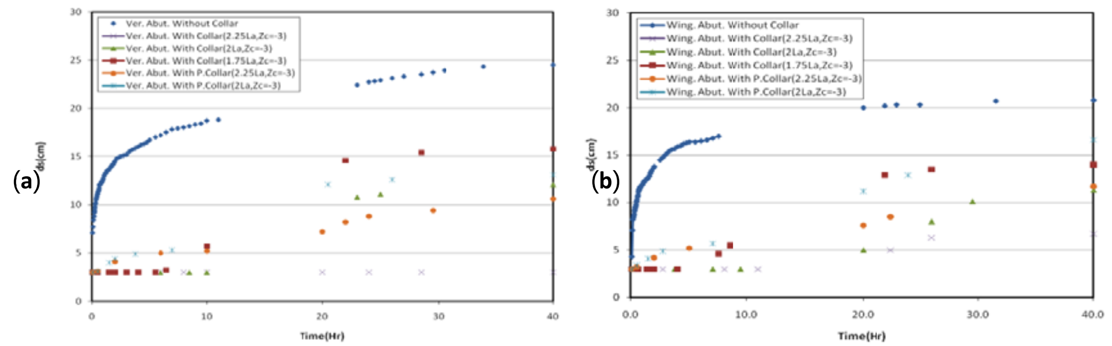
طوق در تراز پایین‌تر از بستر

در این قسمت از آزمایش‌ها، طوق در تراز $Z_c = -3cm$ نصب گردیده است. بدلیل نصب طوق در تراز پایین‌تر از بستر، آب‌شستگی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول آب‌شستگی که در دقایق اول آزمایش رخ می‌دهد، ذرات ماسه‌ای روی طوق به سرعت شسته شده و پس از برخورد مستقیم جریان آب به طوق ابعاد آب‌شستگی افزایش یافته و تا گوشه خارجی طوق ادامه پیدا می‌کند. در مرحله دوم آب‌شستگی همانند حالت قرارگیری طوق در تراز بستر، آب‌شستگی به زیر طوق راه پیدا کرده و نهایتاً به کناره تکیه‌گاه می‌رسد.

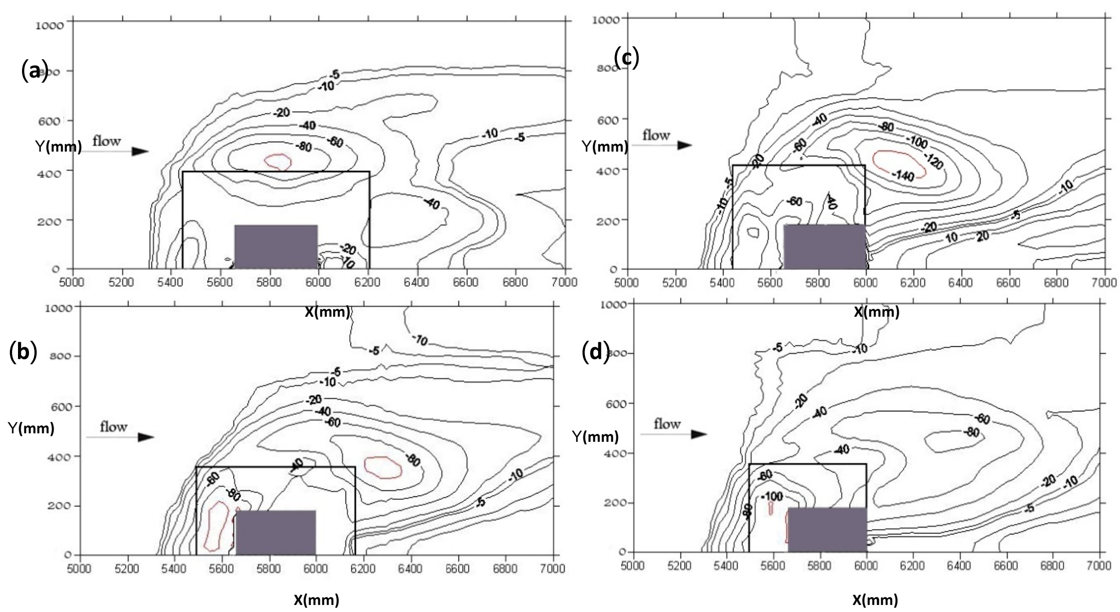


شکل ٦ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه دیوار باله‌ای (a)حالت بدون طوق؛ (b)طوق با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$؛ (c) طوق با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$؛ (d) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$ و (e) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$

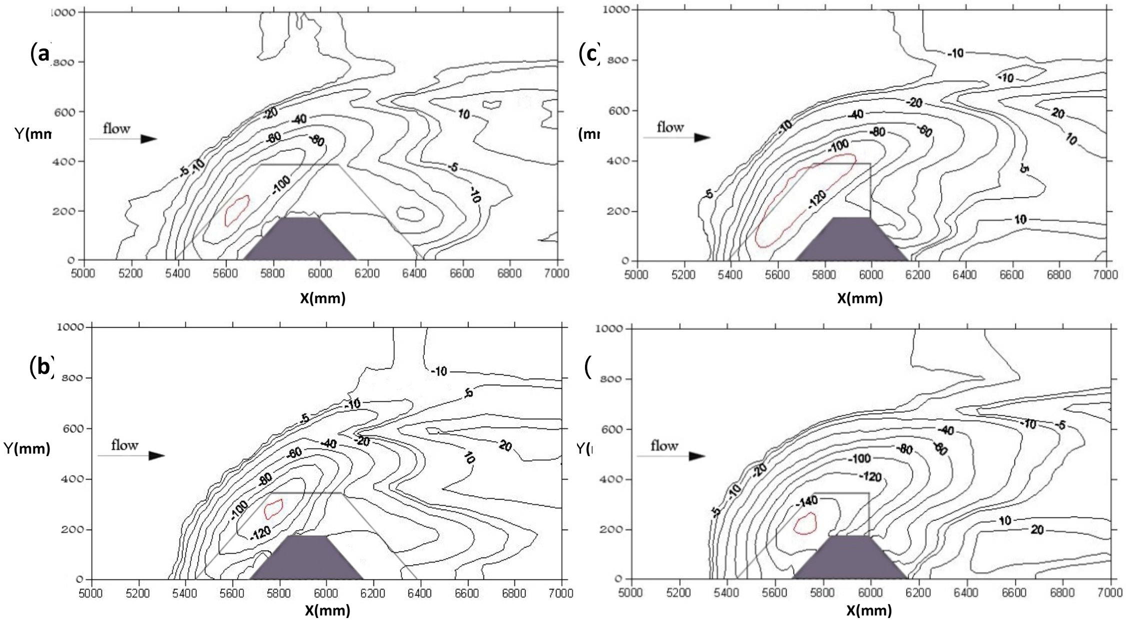
همانطور که در شکل (۷-a) مشخص است مدت زمان شروع آب‌شستگی کناره دیوار تکیه‌گاه (مدت زمان رسیدن حداکثر آبشستگی به کناره تکیه‌گاه) برای آزمایش‌های VT6، VT7، VP11 و VP12 به ترتیب ٦٦٠(١١ ساعت)، ٣٦٠ (٦ ساعت)، ٩٠٠ (١٥ ساعت) و ٤٢٠ (٧ ساعت) دقیقه می‌باشد. عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه در این حالت نسبت به زمانی که طوق با طول برابر بر روی بستر قرار گرفته، کاهش می‌یابد. برای این حالت نیز همانند حالتی که طوق در کف بستر قرار می‌گیرد، هر چه طول طوق بیشتر می‌شود عمق ماکزیمم آب‌شستگی از تکیه‌گاه دورتر می‌شود. علاوه بر این، هر چه طوق در تراز پایین‌تری قرار می‌گیرد عمق آب‌شستگی کناره‌ی تکیه‌گاه کاهش یافته و عمق حداکثر آب‌شستگی از تکیه‌گاه فاصله گرفته است. همچنین، زمان شروع آب‌شستگی کناره دیوار تکیه‌گاه برای آزمایش‌های WT5، WT6، WT7، WP11 و WP12 به ترتیب برابر با ١٠٢٠(١٧ ساعت)، ٩٦٠(١٦ ساعت)، ٣٣٠(٥/٥ ساعت)، ٩٠٠(١٥ ساعت) و ٧٢٠ (١٢ ساعت) دقیقه می‌باشد.



شکل ٧ نمودار تغییرات عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره بدون طوق و با طوق در تراز پایین‌تر ازبستر نسبت به زمان برای (a) تکیه‌گاه مستطیلی و (b) تکیه‌گاه دیوار باله‌ای



شکل ٨ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه مستطیلی (a) طوق با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$؛ (b) طوق با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$؛ (c) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$ و (d) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$



شکل ۹ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه دیوار باله‌ای (a)طوق با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$؛ (b) طوق با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$؛ (c) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$ و (d) طوق تکه‌ای با $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$

با توجه به توپوگرافی تغییرات بستر (شکل ۹ و ۸)، هر چه طول طوق بیشتر می‌شود عمق ماکزیمم آب‌شستگی کل از تکیه‌گاه دورتر می‌شود. در تمامی حالات با کاهش تراز قرارگیری طوق، فاصله محل وقوع عمق آب‌شستگی ماکزیمم نسبت به تکیه‌گاه دیوار باله‌ای کاهش می‌یابد و در فاصله نزدیکتری قرار می‌گیرد.

برای طوق کامل به طول $2.25L_a$، عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه دیوار باله‌ای ۶/۷ سانتی‌متر و محل وقوع عمق آب‌شستگی ماکزیمم در فاصله‌ی ۱۵/۵ سانتی‌متری از کناره تکیه‌گاه ۱۲/۵ سانتی‌متر بدست آمده است. برای طوق تکه‌ای با طول برابر در فاصله‌ی ۱۷/۷ سانتی‌متری از کناره تکیه‌گاه ۱۴/۲ سانتی‌متر و در کناره‌ی تکیه‌گاه ۱۱/۷ سانتی‌متر می‌باشد.

طوق در تراز بالاتر از بستر

برای بررسی این پارامتر، طوق به طول ۲/۲۵ برابر تکیه‌گاه مستطیلی و طوق به طول ۲ برابر تکیه‌گاه دیوار باله‌ای به عنوان نمونه آزمایشی انتخاب شده که در تراز ۳ سانتی‌متر بالاتر از بستر قرارگرفته است. با توجه به این‌که طوق جریان اطراف تکیه‌گاه را به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم می‌کند، در ناحیه پایینی طوق، مکانیزم آب‌شستگی همانند حالت بدون طوق می‌باشد و در نتیجه نرخ آب‌شستگی سریع، قابل پیش‌بینی می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده درصد کاهش عمق آب‌شستگی زمانی که طوق در تراز بالاتر از بستر قرار گرفته نسبت به حالتی که طوق در تراز بستر یا پایین‌تر از بستر مقدار کم‌تری بدست آمده‌است. عمق ماکزیمم آب‌شستگی تکیه‌گاه مستطیلی و تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در کناره تکیه‌گاه رخ می‌دهد که به ترتیب حدود ۳۵ و ۲۴ درصد کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

توسعه زمانی آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه در حضور طوق با اندازه، شکل و ترازهای مختلف قرارگیری طوق در این تحقیق مطالعه و بررسی شده است.مشاهده شد که در تمامی حالات، با افزایش طول

طـوق، حـداکثر عمـق آب‌شسـتگی کـاهش مـی‌یابـد، همچنین، محل وقوع عمـق مـاکزیمم آب‌شسـتگی بـه ناحیه‌ای دورتر از تکیه‌گاه منتقل می‌گردد. با توجـه بـه نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها و مقایسه میزان کـاهش آب‌شستگی کنـاره تکیـه‌گـاه در حضـور طـوق، بـرای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای به ترتیب تراز پایین‌تر از بستر (Z_c=-3cm) و تـراز بسـتر (Z_c=0cm) بهتـرین تراز قرارگیری طوق می‌باشد. با مقایسه طوق تکه‌ای بـا طوق کامل با سطوح مقطع تقریباً برابر، برای تکیـه‌گـاه مستطیلی درصد کاهش عمق آب‌شسـتگی بـرای طـوق تکه‌ای افزایش یافته است؛ در حالی که برای تکیـه‌گـاه دیوار بالـه‌ای رونـد تغییـرات تقریبـاً خطـی مـی‌باشـد. بیشترین کاهش عمق آبشستگی در تکیه‌گـاه مسـتطیلی برابر ۸۷/۸ درصد است که با بکاربردن طـوق بـا طـول $2.25L_a$، تراز قرارگیری $-0.2L_a$، سطح مقطـع $0.802A_T$ (شرایط آزمـایش VT5) حاصـل مـی‌شـود در حالیکـه بیشترین کاهش عمق آبشستگی در دیوار بالـه‌ای برابـر ٦٧/٨ درصد است و برای طوق با طـول $2.25L_a$، تـراز قرارگیری $-0.2L_a$ و سـطح مقطـع $0.793A_T$ (آزمـایش WT5) مشاهده گردید

مراجع

1. Melville, B. W., "Local Scour at Bridge Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, pp 615-631, (1992).
2. Dey, S. and Barbhuiya,A.K., "Time Variation of Scour at Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp. 11-23, (2005).
3. Melville, B., van Ballegooy,S., Coleman,S., and Barkdoll, B., "Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, pp. 563-574, (2006).
4. Molinas, A., Kheireldin, K., Wu, and Baosheng., "Shear Stress around Vertical Wall Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, pp. 822, (1998).
5. Chiew, Y.M., "Scour Protection at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, pp. 1260-1269, (1992).
6. Kumar, V., Ranga Raju, K.G., and Vittal, N., "Reduction of Local Scour around Bridge Piers Using Solts and Collars", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, pp. 1302-1305, (1999).
7. Mashair, M.B., Zarrati, A.R. and Rezayi, A.R., "Time Development of Scouring around a Bridge Pier Protected by Collar", *2nd International Conference on Scour and Erosion, ICSE-2*, Singapore, 8 p, (2004).
8. Mashahir, M.B, Zarrati, A.M. and Mokallaf, E., "Application of Riprap and Collar to Prevent Scouring around Rectangular Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, pp. 183-187, (2010).
9. Hua Li, Roger A. Kuhnle, Brian D. Barkdoll, "Countermeasures Against Scour at Abutments", *Report No. 49 Oxford, Mississippi*, (2006).
10. Kayaturk, S.Y., Kokpinar, M.A. and Gogus, M., "Effect of Collar on Temporal Development of Scour around Bridge Abutments", *2nd International Conference on scourand erosion, IAHR*, Singapore, 14-17 November, pp. 180-186, (2004).
11. Kirkgoz, M .S., Ardichoghlu, M., "Velocity profiles of developing and developed open channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1099-1015, (1997).
12. Lauchlan, C.S., Melville, B.W., "Riprap protection at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, pp. 412-418, (2001).
13. Melville, B.W., "Pier and Abutment scour: Integrated approach.", *Journal of Hydraulic Engineering*,ASCE ,123(2), 125-136, (1997).